

## ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ PbTe(Cr) ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ТЕМПЕРАТУРЫ И ПОД ДАВЛЕНИЕМ

Каширская Л. М., Рябова Л. И., Тананаева О. И., Широкова Н. А.

Исследованы температурные зависимости концентрации носителей заряда, подвижности и удельного сопротивления в монокристаллических образцах PbTe(Cr) с разным содержанием хрома  $0.2 \leq C_{Cr} \leq 0.4$  ат%. Обнаружено, что в образцах со стабилизированным положением уровня Ферми (УФ) ( $E_F - E_c \approx 100$  мэВ при  $T = 4.2$  К) концентрация электронов  $n$  убывает с повышением температуры, что отвечает смещению УФ вниз по шкале энергий, а температурная зависимость подвижности описывается соотношением  $\mu \sim T^{-1}$ . Изучение гальваномагнитных и осцилляционных эффектов в этих образцах под действием гидростатического сжатия показало, что концентрация электронов возрастает с  $n \approx 1.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  ( $P = 1$  бар) до  $n \approx 2.2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  ( $P = 26$  кбар).

Построены диаграммы относительного смещения краев зоны проводимости, валентной зоны и УФ в PbTe(Cr) под действием давления и при изменении температуры. Показано, что УФ практически не меняет своего положения относительно середины запрещенной зоны. Аналогичные диаграммы были получены ранее для PbTe(In), Pb<sub>1-x</sub>Sn<sub>x</sub>Te(In). Подобный характер перестройки энергетического спектра в PbTe(Cr) и PbTe(In) позволяет предположить, что примесный уровень, стабилизирующий положение УФ, формируется не изолированными атомами In или Cr, а некоторыми комплексами типа примесный атом + дефект кристаллической решетки.

К группе легирующих добавок, приводящих к стабилизации положения уровня Ферми (УФ) в теллуриде свинца, в последнее время был причислен еще один элемент — хром [1, 2]. Таким образом, свойство, первоначально приписываемое лишь элементам III группы таблицы Менделеева (In, Tl, Ga), оказалось присущим и одному из переходных металлов. Эффект стабилизации положения УФ в PbTe(Cr) наблюдается при достаточно высоком значении энергии Ферми  $E_F - E_c \sim 100$  мэВ, что соответствует концентрации электронов  $n \approx 1.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ .

Согласно имеющимся данным, при концентрациях хрома  $C_{Cr} \leq 0.4$  ат% форма поверхности Ферми и значения эффективных масс  $m^*$  не изменяются по отношению к нелегированному PbTe [2, 3]. В то же время магнитные свойства атомов Cr проявляются в возникновении обменного взаимодействия с зонными электронами, что приводит к перенормировке эффективных  $\tilde{g}$ -факторов электронов и появлению зависящей от магнитного поля и температуры добавки  $\tilde{g}'(H, T)$  [2]. Всеобъемлющая информация о зарядовых состояниях Cr в PbTe отсутствует. Донорное действие Cr связывают с наличием атомов в состоянии Cr<sup>+3</sup>. Однако в условиях химической стабилизации УФ не исключена возможность появления Cr<sup>+2</sup> и Cr<sup>+1</sup>. Структуру формируемых примесных уровней также нельзя считать однозначно определенной. Существует предположение о наличии двух и более примесных уровней в PbTe(Cr). Температурные зависимости постоянной Холла  $R_H$ , удельного сопротивления  $\rho$  и подвижности электронов  $\mu$  интерпретируются как с точки зрения смещения стабилизированного УФ относительно дна зоны проводимости [1], так и в рамках моделей, предполагающих перераспределение носителей заряда между примесными и зонными состояниями [4, 5]. В работе [5] отмечается, что вид кривых  $R_H(T)$  зависит как от концентрации примеси хрома, так и от способа приготовления образцов. В связи с этим нами проведены измерения температурных зависимостей кинетических параметров.

тических коэффициентов в совершенных монокристаллах, исследованных ранее в работе [2]. Важную информацию о структуре энергетического спектра дают также эксперименты с применением внешнего давления, ранее для образцов  $\text{PbTe}(\text{Cr})$  не проводившиеся. Эти исследования были предприняты в настоящей работе.

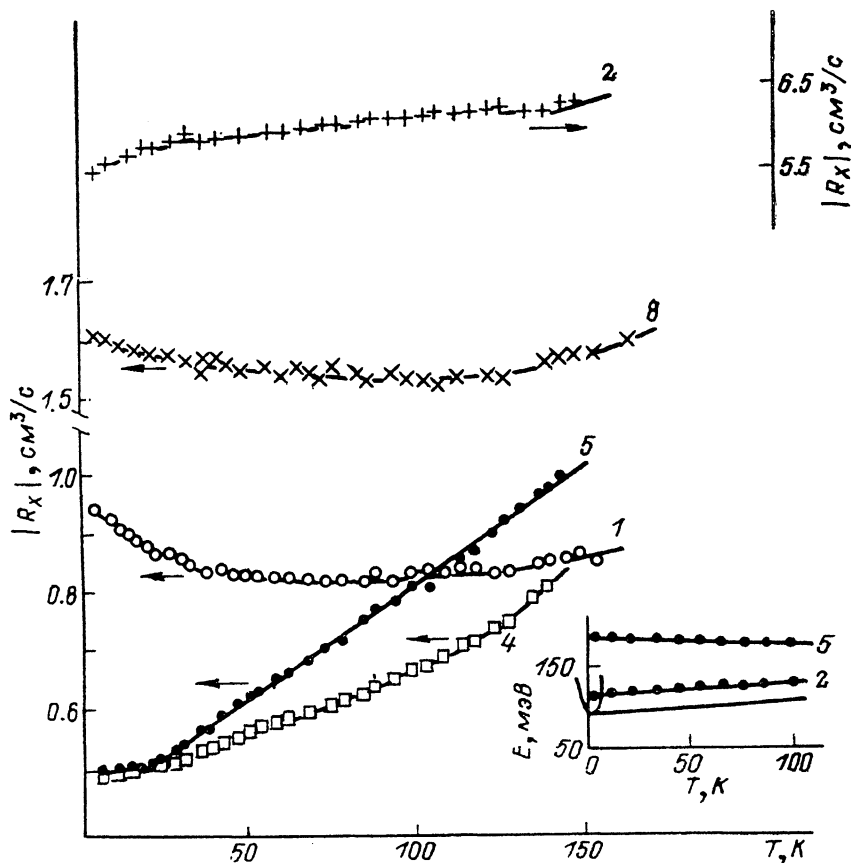


Рис. 1. Вид температурных зависимостей постоянной Холла  $|R_H(T)|$  для образцов  $\text{PbTe}(\text{Cr})$  (1, 2, 4, 5) и нелегированного  $\text{PbTe}$  (8).

Цифры у кривых соответствуют номерам образцов в таблице. На вставке изображена диаграмма перестройки энергетического спектра с изменением температуры для образцов 2 и 5.

## Результаты эксперимента

Характеристики исследованных монокристаллических образцов  $\text{PbTe}(\text{Cr})$  с разным содержанием  $\text{Cr}$  и различным отклонением от стехиометрии приведены в таблице. Способ синтеза и методика монтажа кристаллов подробно описаны в работе [2]. На рис. 1 показаны температурные зависимости коэффициента Холла  $R_H(T)$  для образца  $\text{PbTe}(\text{Cr})$   $p$ -типа (1), кристалла  $n$ -типа с нестабилизированным положением УФ (2), образцов 4, 5, в которых УФ стабилизирован и наблюдаются отчетливые осцилляции магнитосопротивления (см. [2]), а также для нелегированного кристалла  $\text{PbTe}$   $p$ -типа (8). Не показанная на рисунке зависимость  $R_H(T)$  для образца 6 практически совпадает с данными для 4. Зависимость  $R_H(T)$  для образца 3 аналогична полученной для кристалла 2. Из экспериментальных данных следует, что характер зависимостей  $R_H(T)$  для образцов с концентрацией электронов  $n \approx 1.3 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$  при  $T = 4.2 \text{ K}$  качественно отличается от такового для остальных кристаллов.  $R_H(T)$  для образца  $\text{PbTe}(\text{Cr})$   $p$ -типа аналогична зависимости для нелегированного образца. В кристаллах 2, 3 уменьшение  $n$  существенно слабее, чем в 4–6.

Характеристики исследованных образцов при  $T=4.2$  К

№ образца	Способ синтеза	$C_{Cr}$ , ат%	Тип проводимости	$\mu$ , см <sup>2</sup> /В·с	$n_{холл}$ , см <sup>-3</sup>	$n_{оу}$ , см <sup>-3</sup>
1	ПЖК (отжиг в парах Te <sub>2</sub> )	0.2	p	$2.7 \cdot 10^5$	$6.4 \cdot 10^{18}$	$6.3 \cdot 10^{18}$
2	НК (изотермический отжиг)	0.2	n	$2.3 \cdot 10^4$	$9.6 \cdot 10^{17}$	—
3	НК	0.2	n	$2.9 \cdot 10^4$	$6.6 \cdot 10^{17}$	—
4	НК	0.25	n	$7.6 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^{19}$	$1.3 \cdot 10^{19}$
5	НК	0.3	n	$9.0 \cdot 10^4$	$1.3 \cdot 10^{19}$	$1.2 \cdot 10^{19}$
6	НК	0.4	n	$2.1 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^{19}$	$1.3 \cdot 10^{19}$
7	НК	0.3	n	$2.4 \cdot 10^4$	$1.2 \cdot 10^{19}$	$1.2 \cdot 10^{19}$
8	ПЖК	—	p	$1.8 \cdot 10^5$	$3.9 \cdot 10^{18}$	—

Примечание. ПЖК -- метод роста по механизму пар-жидкость-кристалл, НК -- направленная кристаллизация расплава.

Нами был произведен расчет энергии Ферми  $E_F$  для случая вырожденной статистики носителей заряда, что справедливо в области температур  $T \leq 150$  К,

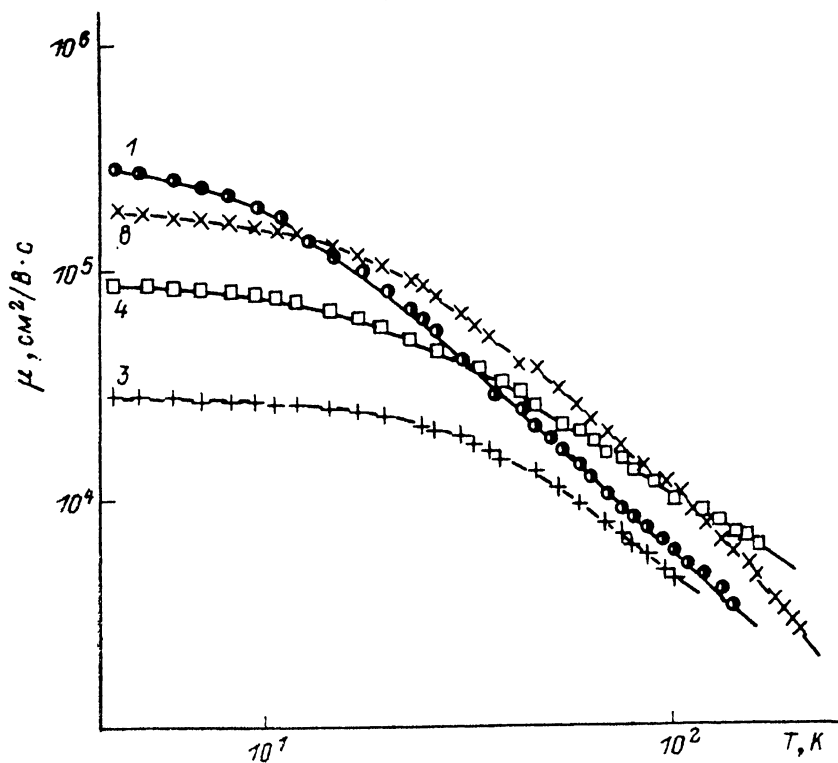


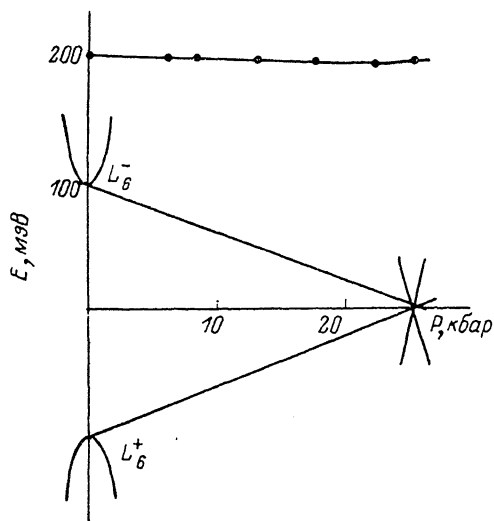
Рис. 2. Вид температурных зависимостей подвижности  $\mu(T)$  для образцов RbTe(Cr) (1, 3, 4) и нелегированного RbTe (8).

в рамках двухзонного приближения. Коэффициент анизотропии  $\alpha$  полагался равным  $\sqrt{10.5}$ ,  $\partial E_g/\partial T = 4 \cdot 10^{-4}$  эВ/К. Изменение положения  $E_F$  относительно дна зоны проводимости для образцов 5 и 2 показано на вставке к рис. 1. Если для образца 2 смещение  $E_F$  относительно  $E_c$  незначительное, то для 5  $\partial(E_F - E_c)/\partial T = (-3 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$  эВ/К, для 4, 6  $\partial(E_F - E_c)/\partial T \approx (-2 \pm 0.2) \times 10^{-4}$  эВ/К, что совпадает с данными работы [1].

Температурные зависимости подвижности для тех же образцов показаны на рис. 2. (Данные для 4-6 практически совпадают). После низкотемператур-

ного плато для всех образцов наблюдается степенная зависимость подвижности от температуры:  $\mu \sim T^{-\nu}$ . Для образцов 4—6  $\nu=1$ , для 1, 8  $\nu=1.7$ , для 2, 3  $\nu=1.3$ .

Гальваномагнитные и осцилляционные эффекты под действием гидростатического сжатия  $P$  до 26 кбар были исследованы для образца 7. Образец размером  $3 \times 0.5 \times 0.6$  мм был смонтирован поперек канала камеры высокого давления в ориентации, близкой к  $\mathbf{H} \parallel \langle 100 \rangle$ . Во всем диапазоне приложенных давлений наблюдалось монотонное увеличение концентрации электронов, сопровождавшееся слабым падением подвижности. По данным холловских измерений, при  $P=26$  кбар  $n=2.2 \cdot 10^{19}$  см $^{-3}$ ;  $\mu \approx 1.1 \cdot 10^4$  см $^2$ /В·с. Отчетливые осцилляции поперечного магнитосопротивления регистрировались вплоть до  $P=26$  кбар. Однако, как показано в работе [2], при концентрации электронов  $\sim 10^{19}$  см $^{-3}$



в магнитных полях до 50 кЭ наблюдается  $\sim 100$  экстремумов осцилляций, и получить монохроматические осцилляционные зависимости во всем интервале магнитных полей можно лишь при условии, что ориентация образца относительно направления  $\mathbf{H} \parallel \langle 100 \rangle$  не превышает нескольких десятых градуса. Произвести столь точную юстировку кристалла внутри камеры высокого давления не представлялось возможным. В связи с этим нам удалось проследить

Рис. 3. Диаграмма, отражающая перестройку энергетического спектра под действием давления для образца PbTe(Cr) (7).

$T=4.2$  К. Точки — экспериментальные данные.

лишь за качественным изменением периода осцилляций в обратном магнитном поле для одной из гармоник. Расчет показал, что изменения концентрации электронов под действием давления, оцененные по периоду осцилляций и по результатам измерений эффекта Холла, полностью совпадают. Это свидетельствует о постоянном значении коэффициента анизотропии  $\alpha$ .

На рис. 3 показано рассчитанное в рамках двухзонного приближения относительное смещение краев зоны проводимости, валентной зоны и УФ ( $\partial E_g / \partial P = 7.4$  мэВ/кбар). Хорошо заметно, что в условиях сближения и инверсии разрешенных зон под давлением положение УФ остается практически фиксированным относительно середины запрещенной зоны.

### Обсуждение результатов

Полученные экспериментальные результаты показывают, что в твердых растворах PbTe(Cr) со стабилизированным положением УФ энергия  $E = E_F + E_g/2$  остается близкой к постоянной величине как при изменении температуры, так и под действием гидростатического сжатия. В хорошем согласии с характером перестройки энергетического спектра при изменении температуры находятся и зависимости  $\mu(T)$ . Наиболее слабое изменение подвижности с температурой ( $\nu \approx 1$ ) наблюдается именно для тех образцов, где УФ стабилизирован, не только в связи с высокой степенью вырождения электронного газа, но и благодаря весьма слабой зависимости эффективной массы от температуры, поскольку  $E(T) \approx \text{const}$ .

В целом данные, полученные для PbTe(Cr), повторяют результаты, полученные ранее для PbTe(In), Pb $_{1-x}$ Sn $_x$ Te(In) [6]. Разница состоит лишь в энергетическом положении стабилизированного УФ. В PbTe(In) при  $T=4.2$  К  $E_F - E_g \approx 70$  мэВ, в PbTe(Cr) — 100 мэВ. Наблюдаемые аналогии в перестройке энер-

гетического спектра для  $\text{PbTe}(\text{Cr})$  и  $\text{PbTe}(\text{In})$  наводят на мысль об общей природе примесных уровней в этих соединениях. По данным работы [7], где исследованы спектры поглощения и фотопроводимости эпитаксиальных слоев  $\text{Pb}_{1-x}\text{Sn}_x\text{Te}(\text{In})$ , количество глубоких примесных центров существенно меньше количества атомов примеси In. Это обстоятельство позволило авторам [7] сделать вывод о том, что глубокие примесные центры обусловлены либо собственными дефектами материала, либо комплексами дефект—примесный атом. С нашей точки зрения, данные настоящей работы свидетельствуют в пользу последней гипотезы, поскольку замена In на Cr приводит к некоторому смещению стабилизированного УФ, но не меняет характера перестройки энергетического спектра под действием давления и с изменением температуры.

В заключение авторы выражают благодарность Е. С. Ицкевичу и Б. А. Акимову за участие в обсуждении результатов работы.

#### Список литературы

- [1] Vulchev V. D., Borisova L. D. // *Phys. St. Sol. (a)*. 1987. V. 99. P. K53—K55.
- [2] Акимов Б. А., Вертелецкий П. В., Зломанов В. П., Рябова Л. И., Тананаева О. И., Широкова Н. А. // *ФТП*. 1989. Т. 23. В. 2. С. 244—249.
- [3] Ratuszek M., Ratuszek M. J. // *Phys. Chem. Sol.* 1985. V. 46. N 7. P. 837—840.
- [4] Тетеркин В. В., Сизов Ф. Ф., Прокофьева Л. В., Громовой Ю. С., Виноградова М. Н. // *ФТП*. 1983. Т. 13. В. 5. С. 782—785.
- [5] Baleva M. J. // *J. Phys. C: Sol. St. Phys.* 1985. V. 18. P. L599—L603.
- [6] Кайданов В. И., Равич Ю. И. // *УФН*. 1985. Т. 145. В. 1. С. 51—86.
- [7] Засавицкий И. И., Матвеевко А. В., Мацонашвили Б. Н., Трофимов В. Т. // *ФТП*. 1987. Т. 21. В. 10. С. 1789—1795.

Институт физики высоких давлений  
им. Л. Ф. Верещагина АН СССР  
Троицк

Получена 3.01.1990  
Принята к печати 30.01.1990